

プラズマ中でのクーロン液体・クーロン結晶観測装置の試作

¹九大基幹, ²九大院総理工
○古屋謙治^{1,2}

Development of an equipment for observing liquid and crystalline plasmas

○Kenji Furuya^{1,2}

¹ Faculty of Arts and Science, Kyushu University, Japan

² Department of Molecular and Material Sciences, Kyushu University, Japan

【Abstract】 We are originally developing an equipment for observing Coulomb crystal and liquid in a DC glow discharge. Using this equipment, the following phenomena have newly been observed. (i) The levitated microparticles are clearly separated in a few layers (or phases): the lower layer is crystal-like and sparse, the middle layer is relatively dense and the included particles are slowly moving, and the upper layer consists of very fast-moving microparticles. (ii) There are three trap areas in this equipment. The flow of microparticles between the center and side areas has been observed. It is possible to control the flow direction by suitably adjusting the applied voltage to the electrodes.

【序】 強相関係は粒子が集団となって初めて発現する性質を有しており、電解質やコロイド溶液、固体材料、プラズマ、宇宙空間など、自然界の至るところに存在する。このような系の振舞いは自己組織化や揺らぎと密接に関連し、極めて興味深い研究対象である。プラズマ中に μm サイズの微粒子が存在すると負に帯電してプラズマ中にトラップされ、この微粒子集団は強相関係として振る舞う。このようなプラズマは"dusty plasma"あるいは"complex plasma"と呼ばれており、1994年にクーロン結晶が観測されて以来、数々の実験結果や分子動力学計算によるシミュレーション結果が報告されてきた[1]。中でも、Yukawa Ballの形成[2]、Wake potentialによる微粒子の配列[3]、微小重力下で浮遊した微粒子集団中に観測されるVoidの形成[4]などは特筆すべき研究成果であろう。その一方で、種々の文献を比較したところプラズマの発生法や電極配置等実験条件に応じて観測されるクーロン結晶・クーロン液体の状態に明確な差異が認められる。このような現状を鑑み、我々は独自にクーロン結晶観測装置を開発して改良を進めながら、様々な条件で観測を進めている。

【実験】 プラズマ中でのクーロン結晶観測装置は、RF放電を用いた装置[5]とDC放電を用いた装置[6]の2種に大別できる。金属製の真空チェンバーを使ってDCグロー放電を行う場合、チェンバーと陽極電位との電位関係によって陽極とチェンバー壁間にも微粒子集団がトラップされるが[7]、このようにしてトラップされた微粒子集団ではクーロン結晶が観測された報告は見当たらない。我々はこの文献の装置を参考にして装置改良を進め、以下のような条件でクーロン結晶を観測することができた。

ステンレス製真空チェンバー内に流量0.7 ccmでArもしくはN₂ガスを流しながら排気し、圧力を25 Pa前後に保った状態で、チェンバー内に設置した2枚の平行な電極に電位(V₁ = -30 ~ -200 V、V₂ = +100 ~ +270 V)を印加してDCグロー放電を発生させた。V₂電極下方に設置した試料台を電極に近づけることで微粒子を帯電させてチェンバー中央付近(V₂電極と試料台に挟まれた空間)に浮遊させた。連続発振の

Nd:YAG レーザー光 (532 nm) を垂直もしくは水平方向にシート状に広げて浮遊した微粒子集団に照射し、散乱光をチェンバー側面や上面からホームビデオで拡大撮影した。2枚の電極中央に穴を開けることにより、V2 電極中央の下方にクーロン結晶を形成することができた。試料台は電氣的に絶縁されているため、上下させても微粒子集団の形状や空間的な位置に大きな影響を及ぼさない。これまで数 μm ~数 $10\mu\text{m}$ のアクリル系高分子 (単分散)、球状シリカ (多分散)、球状アルミナ (多分散)、金属粉末 (多分散) を試してみたが、いずれを用いても安定して微粒子をトラップし、クーロン結晶を観測することができた。さらに、真空チェンバーの水平方向にある枝管の影響により、枝分かれ部分付近にも微粒子集団がトラップされることを確認した。

【結果・考察】 V2 電極の下方にトラップされた微粒子集団の画像の一例を Fig. 1 に示す。画面の大きさは縦 11 mm×横 20 mm である。明確に3層に分かれており、下層は密度の低い綺麗な結晶状態、中央の層は密度が高い状態、上層は微粒子の並進速度が非常に速い状態である。実験条件をうまく整えることで、どの微粒子を用いても Fig. 1 と類似した複数の層からなる浮遊した微粒子集団を観測できた。このようにトラップされた状態を少なくとも 2, 3 時間維持できる。微粒子集団がこのような複数の層に明確に分離することは知られておらず、その理由は明らかではない。DC グロー放電で観測される発光の縞はプラズマ中の電子がその運動エネルギーに応じてバンチングを起こすことに由来すると説明されており[8]、類似の現象が負イオンに帯電した微粒子でも観測されているのかもしれない。ただし、単分散の微粒子を用いたとしても放電により微粒子が壊れた可能性を現時点では否定できないため、さらなる検証が必要である。

Fig. 2 は両端のトラップ領域から中央のトラップ領域へ微粒子が流れ込む様子を撮影したものである。これまでにこのような微粒子の移動の様子を報告した例はない。V1、V2 の電位設定を適切に調整することにより、中央にトラップされた微粒子集団の上層の微粒子のみを左右のトラップ領域に移動させたり、逆に中央に集めたりすることに成功した。このとき、上層の微粒子は上層に、下層の微粒子は下層に移動するのみであり、両者の層の微粒子が混合することはなかった。このような現象も微粒子のバンチングで説明可能なのか、検討を進めている。

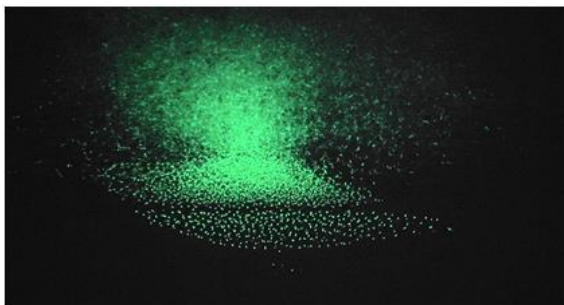


Fig. 1. Microparticles levitated in a DC glow plasma.

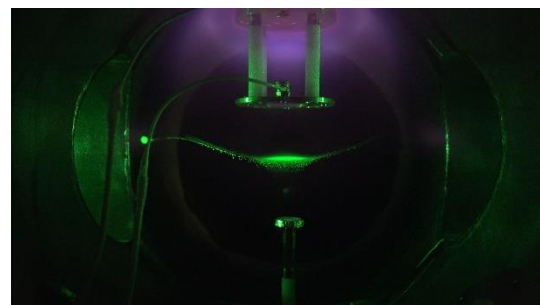


Fig. 2. Flow of microparticles from the side areas to the center area.

【参考文献】

- [1] A. Piel, Plasma Phys. Control., 59 (2017) 014001, and references therein.
- [2] O. Arp, D. Block, A. Piel, Phys. Rev. Lett., 93 (2004) 165001.
- [3] A. V. Zobnin et al., Plasma Phys. Rep., 26 (2000) 415.
- [4] A. P. Nefedov et al., New J. Phys., 5 (2003) 33.
- [5] K. Takahashi et al., Phys. Rev. E, 58 (1998) 7805.
- [6] A. M. Lipaev et al., JETP, 85 (1997) 1110.
- [7] E. Thomas, Jr, M. Watson, Phys. Plasmas, 6 (1999) 4111.
- [8] L. D. Tsendin, Sov. J Plasma Phys., 8 (1982) 228.